سال سی و دوم، شمارهٔ دو، ۱۴۰۰ (۱۳۳–۱۴۸)
DOI: 10.22067/jacsm.2021.71640.1046

تأثیر زاویهٔ پره‌های مغشوش‌کننده بر جریان اطراف میله‌های سوخت هسته‌ای و ارتعاشات القایی آن‌ها با استفاده از آنالیز برهم‌کنش جامد و سیال*

مقاله پژوهشی

منصور طالبی[۱] سیامک نباتی[۲]

چکیده *در مجتمع سوخت رآکتورهای هسته‌ای، پره‌های مغشوش‌کننده اجزایی جامد با ضخامت کم هستند که به شبکه‌های نگهدارندهٔ میله‌های سوخت متصل‌اند و برای افزایش انتقال حرارت به کار می‌روند. نیروهای ناشی از عبور سیال می‌توانند باعث خم‌شدن بیش از حد و ایجاد تنش‌های بسیار زیاد در پره‌ها شوند که عملکرد پره را دچار اختلال خواهد کرد. پره‌ها معمولا با زاویه‌ای مشخص نسبت به جریان قرار می‌گیرند تا بتوانند بهترین اثر را روی جریان داشته باشند و کمترین نیروهای ارتعاشی از سیال به آن‌ها وارد شود. در این پژوهش با استفاده از روش برهم‌کنش سیال و جامد، جریان سیال و جابه‌جایی پره‌ها برای ۳زاویهٔ ۶۵، ۷۰ و ۷۵درجه در یک هندسهٔ خاص بررسی شده است. به این منظور، ابتدا جریان سیال حل‌شده و نیروهای ناشی از سیال بر جسم محاسبه می‌شود. در مرحلهٔ بعد نیروها به جسم جامد وارد و از طریق المان محدود جابه‌جایی جسم محاسبه می‌شود. برای جریان سیال افت فشار محاسبه‌شده با نتایج عددی و تجربی مراجع دیگر مقایسه شده است که اختلاف کمتر از ۱۰درصد را نشان می‌دهد. برای هندسهٔ اصلی بررسی‌شده در این پژوهش بیشترین افت فشار روی پره با زاویهٔ ۶۵درجه نسبت به جریان رخ می‌دهد. ضمنا اغتشاشات ایجادشده در زاویهٔ ۷۵درجه بیشتر از سایر زوایاست. باتوجه‌به نتایج تخمین فرکانس، مشاهده شد که با افزایش فرکانس، اندازهٔ جابه‌جایی کم می‌شود.*

واژه‌های کلیدی پره‌های مغشوش‌کننده، مجتمع سوخت هسته‌ای، آنالیز برهم‌کنش جامد و سیال، ارتعاشات القایی.

مقدمه

در قلب یک رآکتور هسته‌ای به‌دلیل پیچیدگی هندسه و طبیعت غیرپایا و تصادفی جریان‌های مغشوش، نیروهای هیدرودینامیکی و اغتشاشات آن‌ها اهمیت پیدا می‌کند. ارتعاشات ناشی از این نیروها اگر کنترل نشود، ممکن است آسیب‌های جدی به تجهیزات هسته‌ای وارد کند. در مجتمع‌های سوخت، پره‌های مغشوش‌کننده (Mixing Vanes) متصل به شبکه‌های نگهدارنده (Grid Spacer) برای افزایش انتقال حرارت به کار می‌روند. در اثر عبور سیال خنک‌کننده از مجاورت پره‌ها، برهم‌کنش سیال و جامد (Fluid –Solid Interaction) به وجود می‌آید. بدین صورت که ابتدا به‌دلیل نیروی مومنتوم واردشده از سیال، پره‌ها دچار تغییر شکل می‌شوند. این نیروها به‌دلیل خاصیت اغتشاشی جریان، پره‌ها را وادار به اغتشاش می‌کنند. از طرف دیگر ارتعاشات ایجادشده در پره‌ها باعث افزایش اغتشاشات جریان سیال می‌شوند. بنابراین شرایط کاری و قطعات به‌کاررفته باید به‌گونه‌ای باشد که از فرکانس‌های تشدید فاصله داشته باشد.

آنالیز برهم‌کنش سازه و سیال در بسیاری از حوزه‌های مهندسی کاربرد دارد. لی و همکاران [1] برخورد کشتی و آب را با استفاده از آنالیز برهم‌کنش سیال و سازه انجام دادند. آن‌ها با استفاده از روش پیشرفته مدلینگ و شبیه‌سازی در مقیاس کامل، حوادث مختلف کشتی را بررسی و برهم‌کنش آب و سازه کشتی را تحلیل کردند. بوگرز و همکاران [2] نیز با ارائهٔ روش نیمه‌نیوتونی مسئلهٔ برهم‌کنش سیال و جامد را برای سطح آزاد و نقاط تماس جامد بررسی کردند. آن‌ها روشی برای

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۵/۳ و تاریخ پذیرش آن۱۴۰۰/۶/۱۳ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: استادیارمهندسی مکانیک، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، تهران، ایران.
Email: mstalebi@aeoi.org.ir
(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

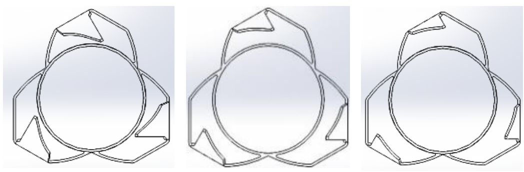
حل مشکل‌های ناشی از برخورد سیال و سطح جامد در سطح آزاد سیال ارائه دادند و با مقایسهٔ ۲خانواده از روش‌های نیمه‌نیوتونی، یک حلگر برای شبیه‌سازی مسئله ارائه دادند. الگوریتم پیشرفته و سریع دیگری را لانگ و همکاران[3] ارائه دادند. آن‌ها با کوپل ۲روش المان محدود یک الگوریتم ساده‌شده تهیه کردند و با مقایسهٔ آن با الگوریتم‌های معمول نشان دادند که الگوریتم مذکور مسائل برهم‌کنش سیال و سازه را دقیق‌تر حل می‌کند. فوریه و همکاران [4] به یک استراتژی کوپل‌کردن بسیار بهینه برای المان محدود و هیدرودینامیک دست یافتند و نشان دادند که استفاده از یک روش لاگرانژی بدون شبکه‌بندی برای سیال، پیچیدگی‌های حل برهم‌کنش سیال سازه را برطرف می‌کند، به‌ویژه برای جریان‌های پیچیده با سطح آزاد. فرانکی و همکاران [5] از فرمول‌بندی لاگرانژی برای شبیه‌سازی برهم‌کنش سیال و جامد استفاده کردند. در روش آن‌ها در هر پلهٔ زمانی ۲مرحله حل وجود داشت. بدین صورت که از روش اجرای محدود برای حل بخش سیال استفاده می‌شد، درحالی‌که برای بخش جامد دامنهٔ حل روش المان محدود به کار رفته بود. ایکسیو و همکاران [6] با بررسی برهم‌کنش سیال و سازه در یک رآکتور هسته‌ای نشان دادند که لرزش‌ها و ارتعاشات و همچنین سطح آب مخازن روی ساختمان محافظ رآکتور اثر خواهد گذاشت.

از جمله مطالعات تجربی می‌توان به آزمایش‌های داوگانگ و همکاران [7] روی پدیدهٔ برهم‌کنش سیال و سازه برای جریان سیال و مجتمع سوخت اشاره کرد. آن‌ها از نتایج آزمایشگاهی برای محاسبهٔ پارامترهای موردنیاز برای آنالیز مودال استفاده کردند. تریودی [8] در پژوهشش به‌مرور به مطالعات روی برهم‌کنش سیال و جامد در توربین‌های هیدرولیکی پرداخت. او روی مسئلهٔ میرایی هیدرودینامیکی تمرکز کرد و دید که اثر میرایی با سرعت جریان آزاد متناسب است. ریکیاردی و همکاران [9] به مطالعهٔ برهم‌کنش سیال و جامد در مجتمع سوخت هسته‌ای به‌صورت آزمایشگاهی پرداختند. آن‌ها مجموعه‌ای نه‌تایی با آرایش ۳در۳ را در نظر گرفتند و اثرات القایی جریان سیال روی حرکت میله‌ها را بررسی کردند و دیدند که با افزایش سرعت، جریان کوپلینگ بین مجموعه‌میله‌ها بیشتر می‌شود. زیونگ و همکاران [10] اثر پره‌های مغشوش‌کننده را با اندازه‌گیری تجربی سرعت‌سنجی تصویر ذرات (Particle Image Velocimetry) مطالعه کردند. آن‌ها با مجموعه‌ای ۵در۵ آزمایشات را انجام دادند و اثر متقابل سیال و سازه را به‌دست آوردند. دوراندهار و همکاران [11] مروری بر کارهای انجام‌شده در مجتمع‌های سوخت و اثر پره‌ها بر جریان و انتقال حرارت درون کانال مجتمع انجام دادند. به‌دست‌آوردن نیروهای اعمال‌شده بر پره‌ها در اثر جریان سیال برای پیش‌بینی تغییر شکل پره‌ها کافی نیست. در حقیقت باید علاوه بر جریان سیال، تغییرات پره‌ها نیز لحاظ شود. اکثر مطالعاتی که در این زمینه انجام شده، فقط نیروهای واردشده از طریق سیال را محاسبه کرده و از تغییر شکل، شتاب و سرعت نوسان پره‌ها صرف نظر شده است. هدف این پژوهش بررسی کیفی و کمی اثر برهم‌کنش جریان سیال خنک‌کننده و پره‌های مغشوش‌کننده با استفاده از روش‌های جفت‌کردن دینامیک سیالات محاسباتی و المان محدود است. در این پژوهش سعی شده است با شبیه‌سازی هر ۲پارامتر، «نیروهای سیالاتی» و «تغییر شکل پره‌ها» بررسی شود.

هندسهٔ مدنظر شبیه به جریان اطراف یک میلهٔ سوخت از مجتمع سوخت رآکتور VVE-1000 است که از طریق شبکهٔ نگهدارنده و پره‌های متصل به آن در قسمت میانی احاطه شده است. از نظر ابعاد دقیقا همان موارد رآکتور بوشهر در نظر گرفته شده، اما فقط یک بخش ٢٤سانتی‌متری از میلهٔ سوخت انتخاب شده که شامل یک شبکهٔ نگهدارنده است. شبکه‌های نگهدارنده دارای پره‌های مغشوش‌کننده هستند. این پره‌ها با زاویه‌ای خاص نسبت به میلهٔ سوخت قرار گرفته‌اند و با قرارگرفتن در مسیر آب خنک‌کننده، اختلاط شدیدی در

سیال ایجاد می‌شود. افزایش اغتشاشات باعث افزایش برداشت گرما می‌شود. از طرفی برخورد سیال مغشوش به پره‌ها باعث واردشدن نیروی زیادی به پره‌ها، شبکۀ نگهدارنده و در نتیجه میلۀ سوخت می‌شود. ماهیت نیروهای حاصل از اغتشاش جریان، تصادفی است. از طرف دیگر، به‌علت واردشدن نیروی شدید به پره‌ها، آن‌ها دچار تغییر شکل می‌شوند که این تغییر شکل به جریان بالادستی و اغتشاشات آن و همچنین اندازه، زاویه و جنس پره‌ها وابسته است. وجود جابه‌جایی در پره‌ها میزان نوسانات نیروهای واردشده به شبکۀ نگهدارنده را تغییر می‌دهد. در کار حاضر با استفاده از روش دوسویۀ شبیه‌سازی برهم‌کنش سیال و جامد میزان این جابه‌جایی‌ها و نیروهای واردشده به پره‌ها در ۳زاویه مختلف بررسی می‌شود که از نظر روش‌شناسی تاکنون به این صورت و برای پره‌های مغشوش‌کنندۀ برهم‌کنش دوسویه استفاده نشده است. در مطالعات داخلی و خارجی تمرکز روی اثر شبکۀ نگهدارنده بوده است و نه روی پره‌ها. در این مقاله همچنین زاویۀ بهینه برای طراحی پره‌های مغشوش‌کننده نیز مطالعه می‌شود.

۳زاویه ٦٥ ، ۷۰ و ۷۵درجه در شبیه‌سازی برای پره‌ها در نظر گرفته شده است. برای پره‌هایی با این اندازه، زاویه‌های کمتر از ٦٥درجه باعث برخورد پره به دیوارۀ میلۀ سوخت می‌شود و همچنین برای پره‌هایی با زاویۀ بزرگ‌تر از ۷۵درجه به‌دلیل کوچک‌شدن فاصلۀ بین پره و دیواره، مرز تناوبی شبیه‌سازی دچار مشکل برخورد پره‌ها با دیوارۀ میلۀ سوخت خواهد شد (شکل ۱). لازم به یادآوری است که زاویۀ ۷۰درجه مطابق با زاویۀ پره‌ها در رآکتورهای استفاده‌شده در کشور است.



زاویۀ پره ۷۵درجه — زاویۀ پره ۷۰درجه — زاویۀ پره ٦٥درجه

شکل ۱ پره‌های مغشوش‌کنندۀ اطراف میلۀ سوخت با ۳زاویه

معادلات حاکم و روش حل

معادلات حاکم بر حرکت سازه. معادلۀ حرکت برای سیستم با درجات آزادی بسیار زیاد به‌صورت زیر گسسته‌سازی می‌شود [12]:

$$[M]\ddot{u}(t) + [C]\dot{u}(t) + [K]u(t) = F(t) \qquad (۱)$$

که در آن u(t) بردار جابه جایی، F(t) بردار نیروهای خارجی (بارگذاری)، [M] ماتریس مربوط به جرم، [C] ماتریس مربوط به میرایی و [K] نیز بردار مربوط به سخت یا نیروی کشسانی داخلی است. فرض میرایی رایلی نیز اغلب برای تعریف ماتریس میرایی براساس ماتریس جرم و ماتریس سختی به‌صورت زیر به کار برده می‌شود:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \qquad (۲)$$

که در آن α و β دو عدد ثابت هستند. جواب عمومی معادلۀ (۱) با فرض میرایی رایلی نیز به صورت زیر بیان می‌شود:

$$u(t) = \sum_{n=1}^{N} u_n(t) = \sum_{n=1}^{N} \Phi_n q_n(t) \qquad (۳)$$

$$m_n\ddot{q}_n(t) + c_n\dot{q}_n(t) + k_n q_n(t) = F_n(t) \qquad (٤)$$

که در آن Φ_n بردار ویژۀ متناسب با مقدار ویژۀ ω_n^2 است و n مربوط به مختصات مودال است. همچنین داریم:

$$\begin{aligned} F_n &= \phi_n^T F(t) \\ m_n &= \phi_n^T [M]\phi_n \\ k_n &= \phi_n^T [K]\phi_n = \omega^2 m_n \\ c_n &= \phi_n^T [C]\phi_n = \alpha m_n + \beta k_n \\ &= \left(\alpha + \omega^2\beta\right) m_n \end{aligned} \qquad (٥)$$

معادلۀ (٤) را می‌توان به‌صورت زیر بازنویسی کرد:

$$m_n\ddot{q}_n(t) + 2\zeta_n\omega_n\dot{q}_n(t) + \omega_n q_n(t) = \frac{F_n(t)}{m_n}$$ (۶)

که در آن ζ_n بیانگر نسبت میرایی در nامین مد است:

$$\zeta_n = \alpha/2\omega_n + \beta\omega_n/2$$ (۷)

در شبیه‌سازی‌ها فقط میرایی سختی (β) به کار برده می‌شود و به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\beta = 2\zeta_n/\omega$$ (۸)

که در آن ζ، ضریب میرایی و ω فرکانس تشدید مربوط به ماده است و برای مواد مختلف از طریق آزمایش محاسبه می‌شود.

معادلات حاکم بر حرکت سیال. معادلات حاکم بر جریان سیال، معادلهٔ پیوستگی، مومنتوم و انرژی هستند [13] که با حلگر فلوئنت حل شده‌اند. این معادلات به‌ترتیب عبارت‌اند از:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla.(\rho\vec{v}) = 0$$
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{v}) + \nabla.(\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla p + \nabla.\mu\left[(\nabla\vec{v} + \nabla\vec{v}^T) - \frac{2}{3}\nabla.\vec{v}I\right]$$
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) + \nabla.(\rho C_p T\vec{v}) = \nabla.(\kappa_{eff}\nabla T)$$ (۹)

برای مدل‌کردن جریان مغشوش از مدل $k-\varepsilon$ استفاده شده است که مدلی نیمه‌تجربی است و در آن ویسکوزیتهٔ اغتشاشی با ۲ترم انرژی اغتشاشات (k) و اتلاف اغتشاشات (ε) محاسبه و با ۲معادلهٔ ترابرد ارائه می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla.(\rho k\vec{v}) = \nabla.\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\nabla k\right) + G_k + G_b - \rho\varepsilon + S_k$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \nabla.(\rho\varepsilon\vec{v}) = \nabla.\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\nabla k\right) + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3\varepsilon}G_b) - C_{1\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon$$ (۱۰)

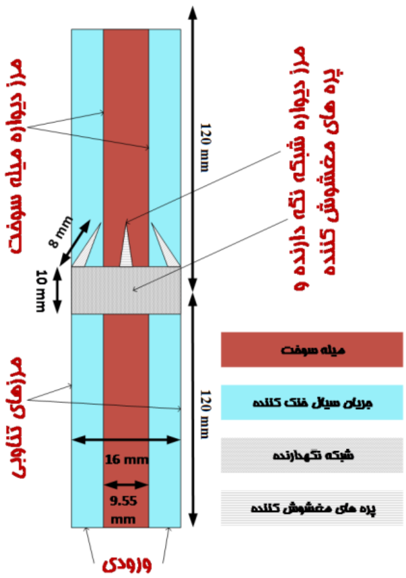
که $\mu_t = \rho C_{1\varepsilon}\frac{k^2}{\varepsilon}$ ویسکوزیتهٔ توربولانسی است. سایر عبارت‌های ارائه‌شده به فرم های مختلف مدل k-ε بستگی دارد. برای مدل استاندارد این ثابت‌ها عبارت‌اند از:

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_{3\varepsilon} = 0.0, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$$ (۱۱)

معادلات حاکم بر ۲ناحیهٔ مجزای جامد و سیال به‌ترتیب با استفاده از حل‌کننده‌های المان محدود و دینامیک سیالات محاسباتی موجود در ANSYS Workbench کوپل و به روش دوسویه حل می‌شوند. نرم‌افزار انسیس پس از این‌که میدان فشار را در حلگر فلوینت محاسبه کرد، توزیع فشار روی سطوح را به بخش انسیس مکانیکال منتقل می‌کند. در این حالت، سطوح مرزی تحت فشار قرار می‌گیرند. پس از حل المان محدود، جابه‌جایی محاسبه می‌شود. پس از این‌که جابه‌جایی محاسبه شد، هندسه تغییر می‌کند و مجدد به‌صورت خودکار شبکه‌بندی می‌شود. اطلاعات شبکهٔ جدید به فلوئنت سپرده می‌شود و مجدد میدان فشار و سرعت برای شبکه‌بندی جدید حل می‌شود.

ناحیهٔ محاسباتی و روش حل. هندسه و ناحیهٔ محاسباتی جریان سیال همراه با شرایط مرزی در شکل (۲) نشان داده شده است. هندسهٔ بررسی‌شده یک کانال جریان سیال در اطراف یک میلهٔ سوخت است که در ارتفاع مشخص بر سر راه آن شبکهٔ نگهدارنده و پره‌ها قرار گرفته‌اند. مرز پایینی هر پره (صفحه‌ای که در آن پره به شبکهٔ نگهدارنده متصل شده است) به‌عنوان صفحهٔ ثابت‌شده در نظر گرفته می‌شود. دیگر صفحه‌ها نیز دیواره‌هایی هستند که به‌صورت مستقیم با سیال در تماس‌اند و نیروی فشاری سیال به آن‌ها وارد می‌شود. این صفحات با عنوان صفحهٔ مشترک سیال جامد معرفی

می‌شوند. البته از تأثیر ارتعاش میلهٔ سوخت بر میدان سیال صرف‌نظر شده است.

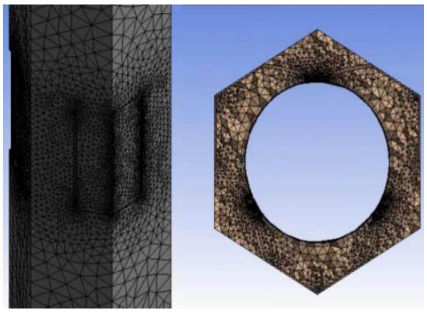


شکل ۲ هندسه و شرایط مرزی

هندسه از ۲ناحیهٔ سیال و جامد تشکیل شده است. باتوجه‌به این‌که برای بخش جامد قابلیت نوسان در نظر گرفته شده است، شبکه‌بندی موجود در بخش جریان از نوع شبکه‌بندی متحرک است. برای افزایش دقت شبکه‌بندی از توابع انحنا و تقارب (Curvature and Proximity) استفاده می‌شود تا تأثیرات انحنا و نزدیک‌بودن مرزها در ریزترشدن سلول‌ها ایجاد شود.

برای این‌که بتوان به مقادیر y+ متناسب با روش اغتشاشی k-ε برای سلول‌های نزدیک به دیواره رسید، باید اندازهٔ این سلول‌ها مقداری باشد که عدد بی‌بعد y+ نزدیک به ۳۰ شود. به همین دلیل از شبکه‌بندی لایهٔ مرزی استفاده شده است.

شکل (۳) نمونه‌ای از شبکه‌بندی را نشان می‌دهد که شبکهٔ نگهدارنده و پره‌های مغشوش‌کننده از آن می‌گذرد. در نزدیکی دیوارهٔ میلهٔ سوخت شبکه‌بندی به‌صورت لایه‌ای و ریز است و همچنین در نزدیکی قسمت‌های جامداتی شبکه‌بندی ریزتر می‌شود. شکل سمت چپ نیز شبکه‌بندی روی مرزهای بیرونی را نشان می‌دهد. باتوجه‌به این‌که هدف برآورده‌کردن جابه‌جایی پره‌هاست، تمام دیواره‌هایی که این صفحات را در بر می‌گیرد، به‌عنوان دیواره‌های تغییرشکل‌دهنده معرفی می‌شوند.



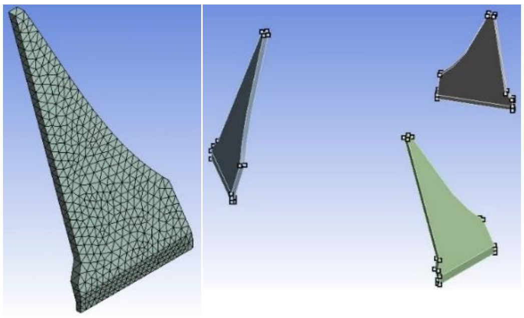
شکل ۳ نمونه‌ای از شبکه‌بندی

جدول ۱ بررسی شبکه‌بندی

افت فشار محاسبه‌شده kPa	زمان رسیدن به هم‌گرایی برای هر time-step	تعداد سلول‌ها
۱۳/۵	۰/۵ دقیقه	۰/۶×۱۰^۶
۱۴/۶	۱/۵ دقیقه	۱/۲×۱۰^۶
۱۵	۵ دقیقه	۲/۴×۱۰^۶
۱۵/۱	۱۰ دقیقه	۴/۸×۱۰^۶
۱۵/۱	۳۰ دقیقه	۹/۶×۱۰^۶

نتایج مطالعهٔ دقت شبکه‌بندی در جدول (۱) نشان داده شده است. در این جدول افت فشار بین مقطع ورودی جریان و خروجی نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش تعداد نقاط از ۲میلیون سلول به بعد تغییر چندانی در نتایج مشاهده نمی‌شود. بنابراین برای حل‌های بعدی از این شبکه‌بندی استفاده می‌شود.

همچنین شکل (۴) نمونه‌ای از شبکه‌بندی قسمت سازه‌ای را نشان می‌دهد. این پره‌ها دارای ضخامت هستند و شبکه‌بندی آن‌ها در نزدیکی نقطهٔ اتصال بسیار ریزتر در نظر گرفته شده است.



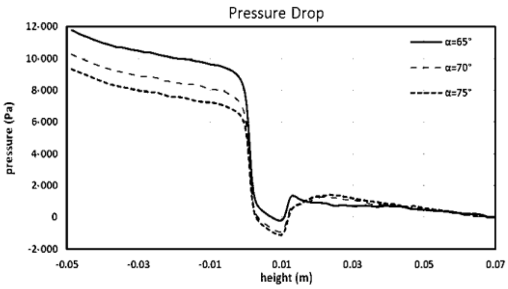
شکل ٤ پره‌های مغشوش‌کننده در تحلیل دینامیک سازه‌ای جداشده از حجم کنترل سیالاتی و شبکه‌بندی

برای حل معادلات حاکم از الگوریتم SIMPLE با دقت مرتبهٔ دو برای همهٔ پارامترها استفاده شده است. عدد رینولدز برمبنای سرعت ورودی و قطر هیدرولیکی مجرای عبور جریان برابر با ۲۳۵۰۰۰ است که نشان‌دهندهٔ جریان مغشوش است. بنابراین مدل k-ε با تابع دیوارهٔ RNG برای شبیه‌سازی اغتشاشات استفاده شده است.

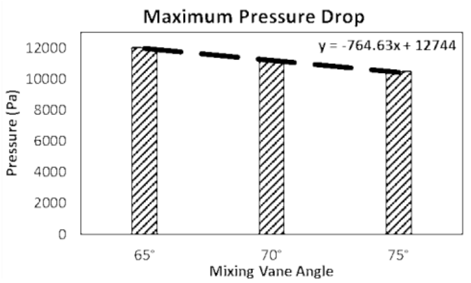
باتوجه‌به مطالعات قبلی [14] بازهٔ زمانی یک ثانیه برای حل در نظر گرفته شده است. در بخش‌های بعدی برای تعیین پلهٔ زمانی از تعریف عدد کورانت $(Co = 0.5\Delta t/\Delta x)$ در تحلیل‌های سیالاتی استفاده می‌شود.

نتایج

نمودار افت فشار برای زوایای مختلف پره‌های مغشوش‌کننده در شکل (۵) نشان داده شده است. در این شکل از ارتفاع منفی ۰,۰۱ تا مثبت ۰,۰۱ افت فشار شدید به‌دلیل حضور شبکهٔ نگهدارنده و پره‌های مغشوش‌کننده است. برای حالت بدون پره نتایج با پژوهش عسگری [15] مقایسه شده است. در هر ۲شبیه‌سازی افت فشار نزدیک به ۱۲کیلوپاسکال مشاهده شد. همچنین در مقایسه با نتایج تجربی مشاهده شد که میزان افت فشار ناشی از شبکهٔ نگهدارنده و پره‌ها در مطالعهٔ حاضر برابر با ۲٦۵۰پاسکال است و برای کارهای تجربی کاروتا [16] برابر با ۳۰۰۰پاسکال که اختلاف کمتر از ۱۲درصد را نشان می‌دهد. قسمت بزرگ افت فشار هنگام عبور جریان سیال از شبکه‌های نگهدارنده و پره‌ها اتفاق می‌افتد.

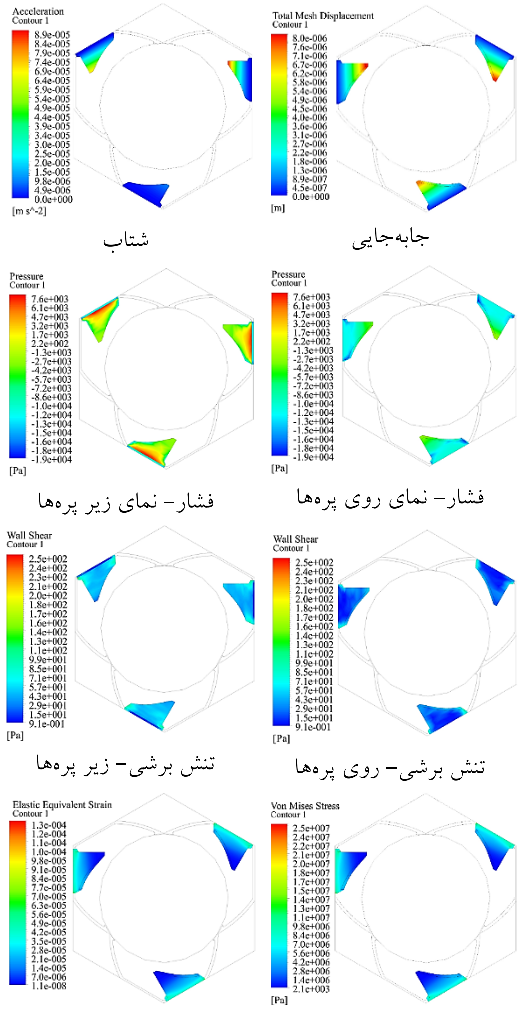


شکل ۵ تغییرات فشار برای زوایای مختلف پره‌ها



شکل ٦ بیشینه افت فشار برای پره‌ها با زوایای مختلف

اثر زاویهٔ پره بر افت فشار کلی. در شکل (٦) بیشینه افت فشار برای زوایای مختلف پره نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بیشترین افت فشار به‌ترتیب در ٦۵درجه در حدود ۱۲کیلوپاسکال، در ۷۰درجه در حدود ۱۱/۱کیلوپاسکال و در۷۵درجه درحدود ۱۰کیلوپاسکال اتفاق می‌افتد. با افزایش زاویهٔ پره‌ها بیشترین مقدار افت فشار طبق رابطهٔ موجود در شکل کاهش پیدا می‌کند. با افزایش زاویه از ٦۵ به ۷۰درجه در حدود ٦درصد کاهش و از۷۰ به ۷۵درجه در حدود ۵درصد کاهش در بیشینهٔ افت فشار مشاهده می‌شود.

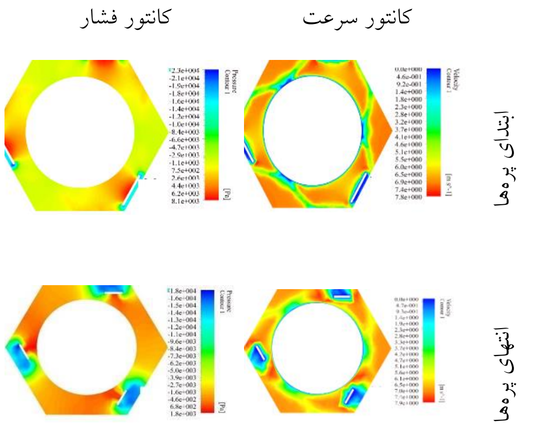


شکل ۷ کانتور جابه‌جایی، فشار، تنش برشی و کرنش پره‌های ۷۰درجه

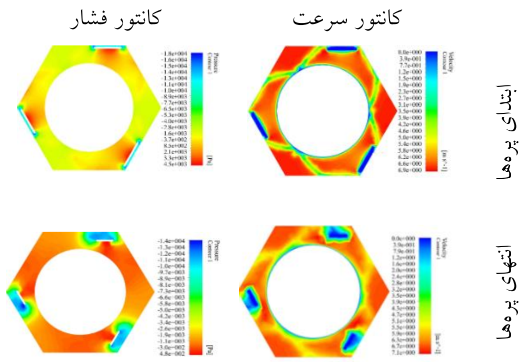
ارتعاش پره‌ها. در اثر برخورد جریان سیال به پره‌های مغشوش‌کننده نیروی فشاری خالص و همچنین نیروی برشی به پره‌ها وارد می‌شود که باعث تغییر شکل پره می‌شود. از آن‌جایی که جریان سیال تحت‌تأثیر اغتشاشات است، نیروی واردشده نیز تصادفی است. اعمال نیروی متناوب به پره‌ها باعث ایجاد جابه‌جایی، سرعت و شتاب در پره‌ها می‌شود. باتوجه‌به این‌که رفتار پارامترها در هر ۳زاویه مشابه است، در شکل (۷) کانتور جابه‌جایی، فشار، تنش برشی و کرنش پره‌ها با زاویهٔ ۷۰درجه نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که هر ۳پره باهم دچار ارتعاش نمی‌شوند که به‌دلیل ماهیت تصادفی جریان است. همچنین، مقدار جابه‌جایی هرکدام متفاوت است. البته این مورد به‌دلیل ذات نوسانی حرکت پره‌هاست. دربارهٔ توزیع فشار دوطرف پره‌ها نیز ملاحظه می‌شود که سیال هر دوطرف پره‌ها را در بر گرفته است، ولی فشار قبل و بعد از پره‌ها به‌شدت متفاوت است. همین تفاوت فشار است که باعث اعمال نیروی خالص فشاری به پره می‌شود. مورد بااهمیت دیگری که ملاحظه می‌شود، این است که اختلاف فشار بیشتر در نقاط نزدیک به شبکهٔ نگهدارنده، جایی که پره عرض بیشتری دارد، اتفاق می‌افتد و با نزدیک‌شدن به نوک پره‌ها اختلاف فشار زیر و روی آن‌ها کم می‌شود، به‌طوری‌که در نوک پره تفاوت فشار نزدیک به صفر است. این امر شبیه یک تیر یک‌سرگیردار است که نیروی گسترده‌ای به آن وارد می‌شود. شکل این نیروی گسترده به‌صورتی است که در نقطهٔ اتصال تیر یک‌سرگیردار به تکیه‌گاه، اندازهٔ نیرو بیشترین مقدار و در انتهای آزاد آن کمترین مقدار باشد. این امر برای هر ۳زاویهٔ پره اتفاق می‌افتد. اندازهٔ این نیروهای فشاری واردشونده به سرعت سیال و میزان اغتشاشات و همچنین زاویهٔ پره‌ها بستگی دارد و همان‌طور که مشاهده می‌شود، از مقیاس $۱۰^{۴}$پاسکال است. البته بیشترین فشار واردشده برای پره‌های ۶۵درجه اتفاق می‌افتد. سیال علاوه بر اثر فشاری روی پره‌ها، تنش برشی نیز به آن‌ها وارد می‌کند که نسبت به نیروی فشاری کوچک‌تر است و از مقیاس $۱۰^{۲}$پاسکال است. کانتور نیروی برشی نیز در شکل (۷) نشان داده شده است. نیروی برشی نیز در زیر و روی پره‌ها رفتار متفاوتی از خود بروز می‌دهد. برخلاف فشار که مقادیر منفی نیز داشت، تنش برشی فقط مقادیر مثبت را نشان می‌دهد. به این معنی که این تنش‌های برشی در زیر و روی پره‌ها همدیگر را خنثی نمی‌کنند، بلکه باهم جمع می‌شوند. پس همواره نیروی برشی خالصی از مقیاس $۱۰^{۲}$پاسکال به پره‌ها وارد می‌شود. البته نیروی برشی در روی پره‌ها به‌علت این‌که سرعت سیال در این ناحیه بسیار کم شده، در مقایسه با زیر پره‌ها که درحال برخورد با جریان سیال است، بسیار کمتر است.

این امر برای هر ۳زاویهٔ پرهٔ بررسی‌شده اتفاق می‌افتد. پره‌ها مطابق همهٔ اجسام جامد پس از اعمال نیرو به آن‌ها دچار تغییر شکل می‌شوند که این تغییر شکل بسته به ضخامت پره‌ها می‌تواند باعث ایجاد تنش و کرنش‌های متفاوتی شود. همچنین میزان این تنش و کرنش به تغییرات جابه‌جایی، سرعت و فشار نیز بستگی دارد. براساس مکانیک مواد واضح است که هرجا کرنش بزرگ‌تر باشد، تنش بیشتری وارد می‌شود. این امر با مشاهدهٔ کانتورهای تنش و کرنش در شکل (۷) مشاهده می‌شود. از طرف دیگر براساس تشابهی که بین پره‌های مغشوش‌کننده و تیر یک‌سردرگیر در بخش قبلی بیان شد، می‌توان انتظار داشت که بیشترین تنش و کرنش در نزدیکی تکیه‌گاه اتفاق می‌افتد.

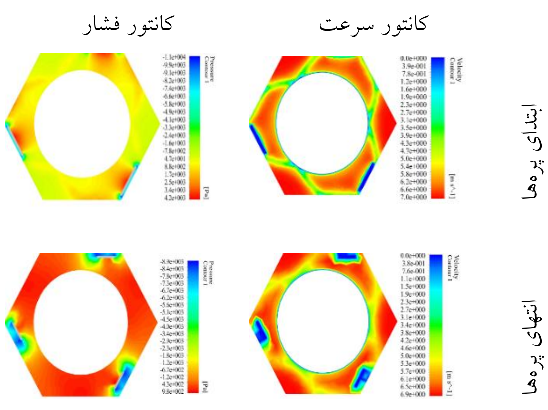
جریان سیال. در این بخش رفتار سیال از منظر سرعت و فشار در ارتفاع مختلف، برای پره‌های با زوایای مختلف نشان داده شده است تا اثر زاویهٔ پره‌ها روی جریان مشخص شود. شکل‌های (۸-۱۰) تغییرات فشار و سرعت را به‌ترتیب برای زوایای ٦۵، ۷۰ و ۷۵درجه نشان می دهند. نتایج در ۲مقطع ابتدایی و انتهایی پره نشان داده شده است. پره‌ها جریان را به‌سمت میلهٔ سوخت منحرف می‌کنند. ناحیهٔ پرفشار و کم‌فشار در زیر و بالای پره‌ها واضح است. در همین نقاط پرفشار و کم‌فشار تغییرات سرعت برعکس است، به این صورت که ناحیهٔ با سرعت بالا در نزدیکی میلهٔ سوخت (جایی که میزان افت فشار نسبت به حالت مرجع کمترین مقدار است) ایجاد شده است. این اثر باعث می‌شود که در نزدیکی میله‌های سوخت لایهٔ مرزی هیدرولیکی نازک‌تر شود. در این صورت در این نواحی ضریب اصطکاک و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی افزایش می‌یابد. همچنین، افزایش ضریب انتقال حرارت می‌تواند باعث کاهش دما شود.



شکل ۸ کانتور سرعت و فشار در ابتدا و انتهای پره‌های ٦۵درجه



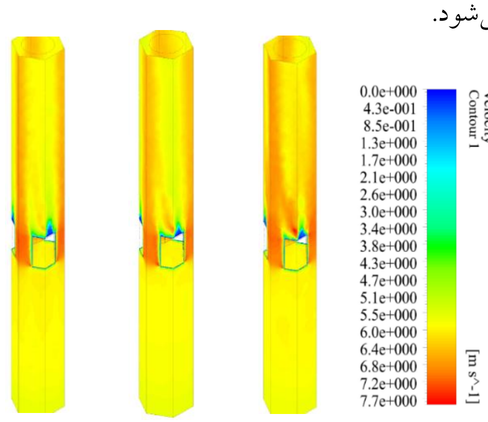
شکل ۹ کانتور سرعت و فشار در ابتدا و انتهای پره‌های۷۰درجه



شکل ۱۰ کانتور سرعت و فشار در ابتدا و انتهای پره‌های ۷۵درجه

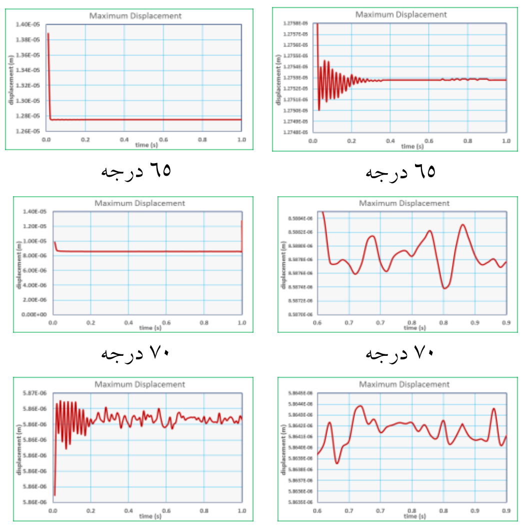
شکل (۱۱) کانتور سرعت را در امتداد محور نشان می‌دهد. این شکل اثر شبکه‌های نگهدارنده روی مقدار سرعت را برجسته کرده است. همان‌طور که ملاحظه

می‌شود، پروفیل سرعت پس از عبور از شبکه‌های نگهدارنده و پره‌ها دچار تغییرات می‌شود و در آن، نواحی پرسرعت و کم‌سرعت ایجاد می‌شود که این نواحی تا انتهای شکل پابرجا می‌مانند. به‌نظر می‌رسد که پره‌ها روی تغییرات سرعت ناشی از شبکهٔ نگهدارنده اثرگذار باشند. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، تأثیر شبکه‌های نگهدارنده و پره‌ها بر مقدار سرعت در زاویهٔ ٦٥درجه بیشتر و تا ارتفاع بالاتری وجود دارد، به‌طوری‌که نواحی قرمزرنگ تا ارتفاع بیشتری دیده می‌شود.



۷۵درجه ۷۰درجه ٦٥درجه

شکل ۱۱ کانتور سرعت در امتداد جریان



٦٥ درجه ٦٥ درجه

۷۰ درجه ۷۰ درجه

۷۵ درجه ۷۵ درجه

نمودار معمولی نمودار بزرگ‌نمایی‌شده

شکل ۱۲ مقدار جابه‌جایی پره در طول زمان

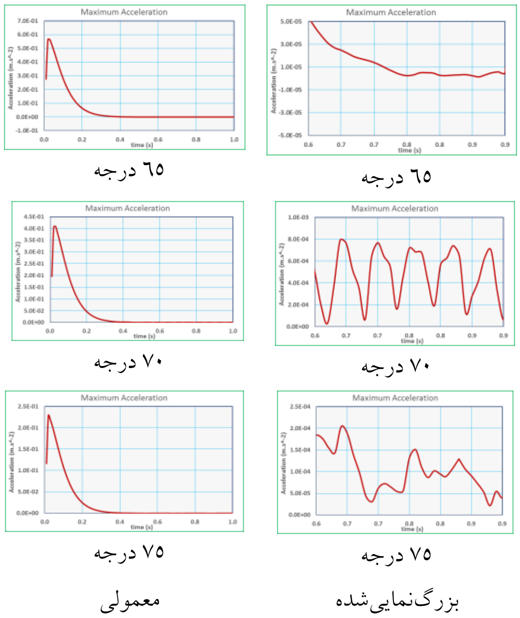
نتایج ارتعاشی. در این بخش نتایج مربوط به رفتار پره‌ها و سیال در گذر زمان نشان داده شده است. باتوجه‌به پیچیدگی مسئله و حل هم‌زمان جریان سیال و مکانیک سازه و همچنین عدد کورانت، گام زمانی نزدیک به ۰/۰۱ ثانیه انتخاب و نتایج برای این حالت رسم شده است. در ادامه تغییرات جابه‌جایی ذره، تغییرات شتاب و سرعت همراه با تغییرات تنش و کرنش بررسی می‌شود.

در شکل (۱۲) رفتار جابه‌جایی پره‌های مغشوش‌کننده در زمان مشخص شده است. می‌توان بیان کرد که پره‌ها پس از برخورد اولیهٔ سیال دچار جابه‌جایی زیاد می‌شوند و سپس در همان حالت می‌مانند و فقط دچار اغتشاشات می‌شوند. این جابه‌جایی اولیه نیز به زاویهٔ پره‌ها بستگی دارد، به‌طوری‌که در پرهٔ با زاویهٔ ٦٥درجه جابه‌جایی نزدیک به ۱۲میکرومتر، در پرهٔ با زاویهٔ ۷۰درجه نزدیک به ۹میکرومتر و در پرهٔ با زاویهٔ ۷۵درجه نزدیک به ٦میکرومتر است. پس از این‌که پره به میزان جابه‌جایی نهایی رسید، در اثر تغییرات فشار و اغتشاشات دچار نوسانات ریز می‌شود. این تغییرات بیشتر ناشی از نزدیکی فرکانس تغییرات ارتعاشات با فرکانس طبیعی پره است.

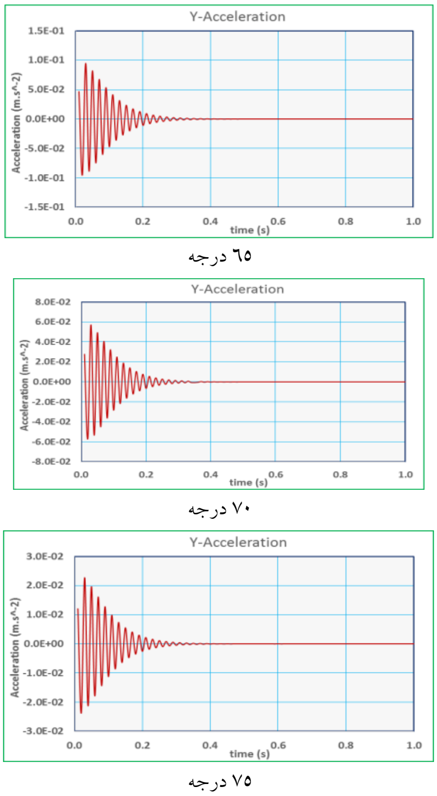
شکل (۱۳) تغییرات شتاب برای پره‌های مختلف را در طول زمان نشان می‌دهد. از منظر شتاب و سرعت قضیه اندکی فرق می‌کند. باتوجه‌به این‌که در ابتدا تغییر شکل زیادی اتفاق می‌افتد، در این ناحیه سرعت و شتاب زیاد است و پس از آن به صفر می‌رسد. گرچه تغییراتی در اندازهٔ شتاب‌ها و سرعت‌هاست، این تغییرات اندازهٔ بسیار کوچکی دارند و بیشتر ناشی از نوسانات کوچک پره‌ها هستند.

در شکل (۱٤) تغییرات شتاب برای ارتفاع (Y) (مؤلفهٔ عمودی شتاب) مربوط به یک نقطه در نوک پره‌ها نشان داده شده است. تغییرات این پارامترها رفتار ارتعاشاتی با میرایی مربوط را از خود بروز می‌دهد. مشخص است که پره‌ها پس از برقراری جریان ابتدا در بازهٔ زمانی کوتاهی نوسان می‌کنند و سپس به حالت نهایی خود می‌رسند و در این زمان تقریبا ارتعاشات

مشاهده نمی‌شود یا مدل اغتشاشی قادر به حل آن نیست. برای این‌که فرکانس‌های خطرناک مشاهده شود، یک آنالیز توان طیفی نیاز است.

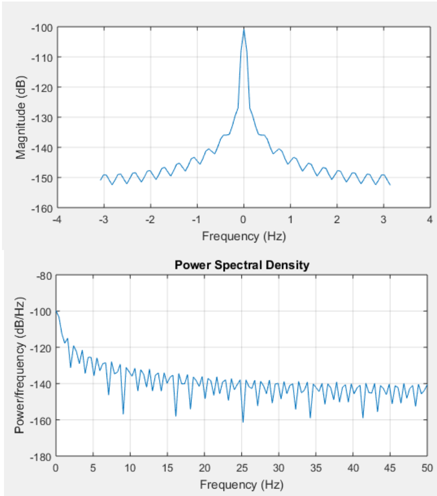


شکل ۱۳ شتاب پره‌ها برحسب زمان

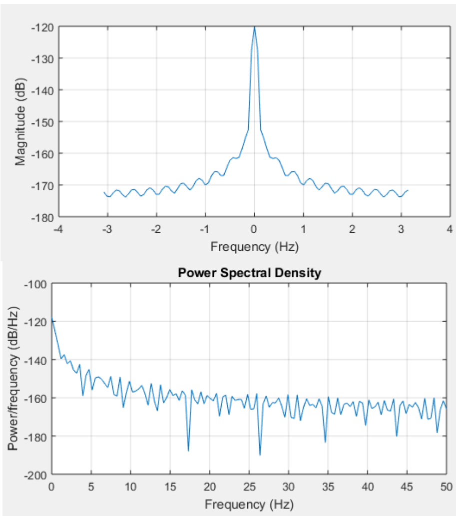


شکل ۱۴ مؤلفه عمودی شتاب برای پرهٔ ۶۵درجه

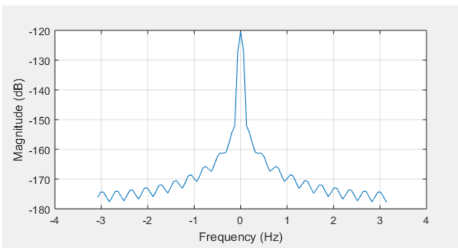
با استفاده از داده‌های مربوط به جابه‌جایی پره‌ها در هر پلهٔ زمانی، می‌توان آنالیز توان طیفی را برای آن پره ارائه داد. نتایج این آنالیز در شکل‌های (۱۵ تا ۱۷) برای پره‌های با ۳زاویه ۶۵، ۷۰ و ۷۵درجه نشان داده شده است.

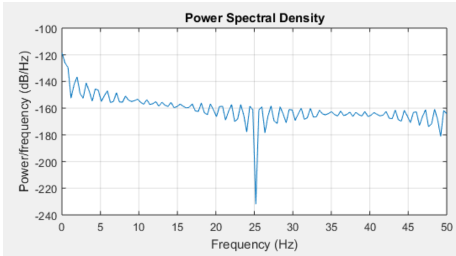


شکل ۱۵ آنالیز توان طیفی برای نتایج جابه‌جایی پرهٔ ۶۵درجه



شکل ۱۶ آنالیز توان طیفی برای جابه‌جایی پرهٔ ۷۰





شکل ۱۷ آنالیز توان طیفی برای نتایج جابه‌جایی پرهٔ ۷۵درجه

برای هر پره دامنهٔ نوسانات و نسبت دامنه به فرکانس ملاحظه می‌شود. در حالت سکون و در جایی که فرکانس ارتعاشات بسیار کوچک است، اندازهٔ جابه‌جایی‌ها تقریبا بیشینه است. با افزایش فرکانس، اندازهٔ جابه‌جایی کاهش می‌یابد. این کاهش برای پرهٔ با زاویهٔ ۷۵درجه شدیدتر است. از تغییرات نسبت توان جابه‌جایی به فرکانس مشاهده می‌شود که در ابتدا انرژی یا توان زیاد است و با بالارفتن فرکانس کاهش می‌یابد. نقاطی که در آن‌ها تغییرات شدید مشاهده می‌شود، نزدیک به نقاط تشدید هستند. با این حال، در زوایای ۶۵ و ۷۰ تعداد این نقاط زیاد و توان آن‌ها کم است و در نتیجه مشکلی ایجاد نمی‌کنند؛ ولی در پرهٔ با زاویهٔ ۷۵درجه در فرکانس ۲۵هرتز یک تغییر شدید مشاهده می‌شود که بیانگر تشدید با انرژی قابل توجه است.

نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی برهم‌کنش سیال و جامد برای شبکه‌های نگهدارنده مجتمع سوخت رآکتور VVER-1000 با پره‌های مغشوش‌کننده در زاویهٔ ۶۵، ۷۰ و ۷۵درجه انجام شد. کوپلینگ ۲راه بین سیال و جامد موفقیت‌آمیز بود و داده‌های جابه‌جایی شبکه‌بندی به حلگر جریان سیال منتقل شد و نیروهای ناشی از سیال نیز به حلگر سازه‌ای انتقال یافت. استقلال از شبکه‌بندی و پلهٔ زمانی انجام شد. همچنین شبکه‌بندی دینامیک نیز با موفقیت صورت پذیرفت. شبیه‌سازی برای زاویه‌های کمتر از ۶۵درجه منجر به برخورد پره‌ها با دیوارهٔ میلهٔ سوخت و در زاویه‌های بیشتر از ۷۵درجه منجر به برخورد به سایر پره‌ها شد و نتایج دچار خطا شد. نتایج زیر به‌دست آمد:

- بیشترین افت فشار به‌ترتیب برای پره‌های با زاویهٔ ۶۵درجه و در حدود ۱۲کیلوپاسکال، با زاویهٔ ۷۰درجه و در حدود ۱۱/۱کیلوپاسکال و با زاویهٔ ۷۵درجه و در حدود ۱۰کیلوپاسکال اتفاق می‌افتد.
- افت فشار بر واحد طول ناشی از شبکه‌های نگهدارنده و پره‌های مغشوش‌کننده به‌ترتیب در ۶۵درجه در حدود ۴۰۰کیلوپاسکال بر متر، در ۷۰درجه حدود ۳۱۰کیلوپاسکال بر متر و در ۷۵درجه در حدود ۲۶۰کیلوپاسکال بر متر اتفاق می‌افتد. در نتیجه بهینه‌ترین حالت پرهٔ ۷۵درجه است.
- همه پره‌های موجود در هندسه با زاویهٔ ۶۵درجه باهم دچار ارتعاش نمی‌شوند، بلکه یک تأخیر فاز دارند.
- مقدار جابه‌جایی نشان‌داده‌شده در هرکدام نیز متفاوت است، به این صورت که در بعضی پره‌ها جابه‌جایی ایجادشده بیشتر از دیگر پره‌هاست. البته این مورد به‌دلیل ذات نوسانی حرکت این پره‌هاست. هرچند که مقدار *جذر میانگین مربعات* ارتعاش پره‌ها اختلاف جزئی خواهد داشت.
- با بالارفتن جریان و نزدیک‌شدن به نوک پره‌ها اختلاف فشار زیر و روی پره‌ها به کمترین مقدار خود می‌رسد و در نوک پره‌ها به‌علت عرض بسیار کم، تفاوت فشار نزدیک به صفر است.
- اندازهٔ این نیروهای فشاری واردشونده به سرعت سیال و میزان اغتشاشات و همچنین زاویهٔ پره‌ها بستگی دارد و از مقیاس ۱۰۴پاسکال است. بیشترین فشار واردشده برای پره‌های ۶۵درجه اتفاق می‌افتد.
- نتایج تحقیق حاضر در طراحی و ساخت مجتمع‌های سوخت و شبکهٔ نگهدارنده آن‌ها کاربرد مهمی دارد.

واژه نامه

برهم‌کنش جامد و سیال	Fluid –Solid Interaction
پره های مغشوش کننده	Mixing Vanes
شبکه نگهدارنده	Grid Spacer
مجتمع سوخت هسته‌ای	Fuel assembly
سرعت سنجی تصویر ذرات	Particle Image Velocimetry
توابع انحنا و تقارب	Curvature and Proximity

مراجع

1. Lee, S. G., Lee, G. S., Lee, H. S., Park, J. H. and Jung, T.Y., "Full-scale ship collision, grounding and sinking simulation using highly advanced M&S system of FSI analysis technique", *Procedia Engineering*, Vol. 173, pp. 1507–1514, (2017).
2. Bogaers, A. E. J., Kok, S., Reddy, B. D. and Franz, T., "An evaluation of quasi-Newton methods for application to FSI problems involving free surface flow and solid body contact", *Computers & Structures*, Vol. 173, pp. 71–83, (2016).
3. Long, T., Hu, D., Yang, G. and Wan, D., "A particle-element contact algorithm incorporated into the coupling methods of FEM-ISPH and FEM-WCSPH for FSI problems", *Ocean Engineering*, Vol. 123, pp. 154–163, (2016).
4. Fourey, G., Hermange, C., Touze, D. L. and Oger, G, "An efficient FSI coupling strategy between smoothed particle hydrodynamics and finite element methods", C*omputer Physics Communications*, Vol. 217, pp. 66–81, (2017).
5. Franci, A., Oñate, E. and Carbonell, J. M., "Unified Lagrangian formulation for solid and fluid mechanics and FSI problems", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 298, pp.
520–547, (2016).
6. Xu, Q., Chen, J., Zhang, C., Li, J. and Zhao, C., "Dynamic analysis of AP1000 shield building considering fluid and structure interaction effects", *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 48, pp. 246–258, (2106).
7. Daogang, L., Aiguo, L., ChaoHao, S., Junjie, D., Yang, H. and Qingyu, X., "Experimental investigation on fluid–structure-coupled dynamic characteristics of the double fuel assemblies in a fast reactor", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 255, pp. 180–184, (2013).
8. Trivedi, C., "A review on fluid structure interaction in hydraulic turbines: A focus on hydrodynamic damping", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 77, pp. 1–22, (2017).
9. Ricciardi, G., Bellizzi, S., Collard, B. and Cochelin, B., "Fluid-structure interaction in a 3-by-3 reduced-scale fuel assembly network", *Science and Technology of Nuclear installations*, Vol. 2010, pp. 1-8, Doi:10.1155/2010/517471, Article ID, 517471, (2010).
10. Xiong, J., Qu, W., Zhang, T., Chai, X., Liu, X. and Yang, Y., "Experimental investigation on split-mixing-vane forced mixing in pressurized water reactor fuel assembly", *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 143, 107450, (2020).

11. Dhurandhar, S. K., Sinha, S. L. and Verma, S. K., "Effects of Mixing Vane Spacer on Flow and Thermal Behavior of Fluid in Fuel Channels of Nuclear Reactors—A Review", Nuclear Technology, Vol. 206, pp. 663-696, (2020).
12. ANSYS, Inc. ANSYS WORKBENCH Guide, (2020).
13. ANSYS, Inc. ANSYS FLUENT Theory Guide, (2020).
14. Smith, S. T. and Fox, R.O., "A term-by-term direct numerical simulation validation study of the multi-environment conditional probability-density-function model for turbulent reacting flows", *Physics of Fluids*, Vol. 19, 85102, doi:10.1063/1.275769, (2007).
15. Asgari, M., Talebi, M. and Abi, M.R., "Numerical Simulation of Pressure Loss and Heat Transfer in Road Bundle Fuel Assembly with Spacer Grids", *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 64, pp. 67-76, (2013) (In Persian).
16. Karouta, Z., Gu, C. Y. and Schölin, B., "3-D flow analyses for design of nuclear fuel spacer", Proceedings of the 7th International Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics NURETH-7. Sessions, pp.17-24, (1995).

Effect of Vanes Angles on the Flow around Fuel Rods and the Induced Vibrations by Analyzing Solid-Fluid Interaction

Mansour Talebi[1], Siamak Nabati[2]

1. Introduction

In a nuclear fuel assembly, mixing vanes are thin solid components which are attached to the grid spacer. These vanes would increase heat transfer from the fuel wall. The force induced by flow may expose the vanes to excessive stress and bending, which in turn, impairs the mixing vanes. In order to improve the heat transfer rate and decrease the vibrational forces, vanes are usually positioned at a certain angle regarding the flow axis.

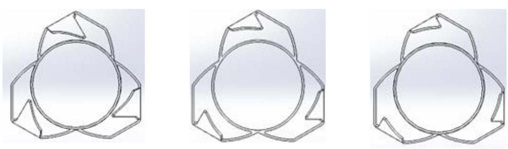
This study investigates fluid flow and displacement of vanes in three angles of 65, 70, and 75 degrees for a specific geometry using the fluid-solid interaction method. First, the fluid flow is solved using a Finite Volume Method (FVM) solver and the forces exposed by the flow to the vanes are estimated. Next, the displacement of the vanes due to the applied forces is calculated by the Finite Element Method (FEM).

2. Statement of the Problem

The geometry is similar to flow around a fuel rod of the VVE-1000 reactor fuel assembly. The fuel rod is surrounded by a grid spacer and vanes attached to it in the middle.

The simulation for the vanes is done for three angles (65, 70, and 75 degrees). The bottom border of each vane is considered as a fixed plate (Figure 1).

The walls that are directly in contact with the fluid and receive the fluid pressure force are considered as plates as well. These plates are referred to as solid-fluid interface plates (Figure 2).



Angle 65 **Angle 70** **Angle 75**

Figure 1. Mixing vanes and fuel rod in different angles

The governing equations, that is, the equations of continuity, momentum, and energy are solved by Fluent solver. To simulate the turbulent flow, the k-ε model is used.

The governing equations for two separate regions of solid and fluid are coupled and solved respectively using the finite elemental and computational fluid dynamics solver in ANSYS Workbench. First, the pressure field is calculated, then the pressure distribution on the surfaces is transferred to Ansys mechanical section. In this case, the boundary surfaces are under pressure. Then the displacement is calculated by the finite element solver. After the displacement is calculated, the geometry changes and the meshing is done again automatically. The new mesh attributes are passed to Fluent, and the pressure field and velocity are resolved for the new geometry.

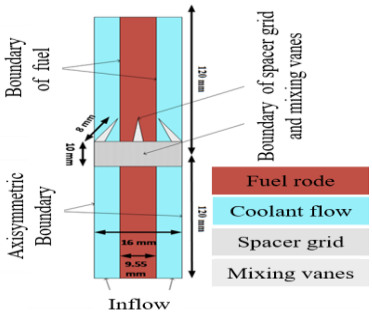


Figure 2. Geometry and boundary conditions

3. Results

In the numerical simulation, the mesh study was examined in terms of computation time and accuracy of results to settle the most appropriate number of mesh points. Also, the results were compared with the references (experimental and numerical results) and were in good agreement. The results obtained in several areas are:

Effect of vane angle on overall pressure loss

The highest-pressure loss occurs at the angle of 65° at about 12 kPa, at 70° at about 11.1 kPa, and at 75° at about 10 kPa. As the vane angle enlarges, the maximum pressure loss decreases. When the vane angle widens from 65 to 70 degrees, a 6% decrease in the maximum pressure loss occurs; and the angle increasing from 70 to 75 degrees brings about a 5% decrease in the maximum pressure loss.

[1] Corresponding Author, Assistant professor of mechanical engineering, Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran.
Email: mstalebi@aeoi.org.ir
[2] Masters Student of Mechanical Eengineering, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

Vibration of the vanes

The results show that not all three vanes vibrate together. This is due to the random nature of the flow. Moreover, the vanes differ in the amount of displacement. The greatest pressure difference occurs at points close to the grid spacer, where the vane is wider. The pressure difference below and above the vane decreases as one approaches the tips, so that the pressure difference at the vane tip is nearly zero.

Fluid flow

After passing through the grid spacer and vanes, the velocity profile changes so that high-velocity and low-velocity zones arise (Figure 11). These zones remain in place until the end of the figure. The vanes seem to affect the velocity changes caused by the grid spacer. At an angle of 65 degrees the effect of grid spacer and vanes on the amount of velocity is at its most (Figure 3).

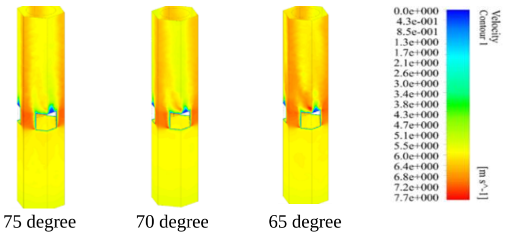


Figure 3. Velocity contour

Vibrating results

It can be said that the initial collision of the fluid displaces the vanes impressively but then they only get turbulent in the same state they are. This initial displacement also depends on the angle of the vanes. So that the displacement is about 12 micrometers in an angle of 65 degrees, about 9 micrometers in 70 degrees and about 6 micrometers in 75 degrees. After the vanes reach the final displacement, they fluctuate slightly due to pressure changes and turbulence. These changes are mostly due to the similarity between the frequency of vibration changes and the normal frequency of the vane. The changes in accelerations and velocities are very small and mostly due to small oscillations of the vanes.

The analysis of Power Spectral Density

The vane displacement data at each time step can be used to analyze Power Spectral Density. The results of such analysis were obtained for the vanes with three angles of 65, 70, and 75 degrees. For each vane, the oscillation amplitude and the ratio of amplitude to frequency are observed. At rest and where there is low-frequency vibration, the displacement magnitude is almost maximal. With an increase in frequency, the displacement decreases. This reduction occurs more drastically for vanes in a 75° angle. Results show that the energy or power is initially high but decreases as the frequency increases. The points where sharp changes are observed, are close to the intensification points. However, at angles 65° and 70° there are lots of these points with low energy. As a result, they do not cause any problems. However, at a frequency of 25 Hz the vane with an angle of 75 degrees experiences a sharp change indicating an intensification with significant energy (Figure 4).

4. Conclusion

Fluid-solid interaction simulation was performed for the grid spacers of the VVER-1000 nuclear fuel assembly with mixing vanes at 65°, 70°, and 75 ° angles.

Since coupling between fluid and solid was successful, the mesh displacement data and the data related to the forces created by the fluid were respectively transferred to the fluid flow solver and the structural solver.

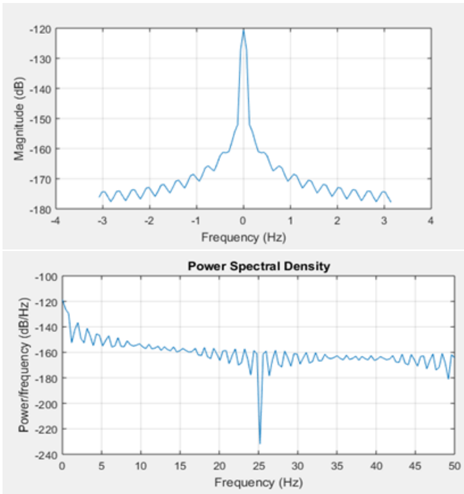


Figure 4. Power spectral density for displacement of 75-degree vane

Mesh and time-step independence was performed. Dynamic meshing was also successful. Simulation for angles less than 65° led the vanes to collide with the fuel rod wall and for angles greater than 75° led to collisions with other vanes; so, the results were erroneous. The following results were obtained:

1. The maximum pressure drop occurs when the vanes are at an angle of 65°, 70°, or 75°. The amount is about 12 kPa, about 11.1 kPa, and about 10 kPa, respectively.
2. Longitudinal pressure drops due to retaining grid spacers and mixing vanes corresponding angles of 65°, 70°, or 75° are about 400 kPa /m,

310 kPa /m, and 260 kPa /m respectively. As a result, the most optimal state is when the vane is at a 75° angle.

3. Not all the vanes in the geometry with a 65° angle vibrate simultaneously. There is a delay phase.

4. Not all the vanes have equal displacement. This is due to the oscillating movement of the vanes. However, the root mean square of vibration of the vanes will vary slightly.

5. As the flow rises and approaches the tip of the vanes, the pressure difference below and above the vanes reaches its minimum. At the vane tip, where the width lowers, the pressure difference tends to zero.

6. The magnitude of these pressure forces depends on the velocity of the fluid, the amount of turbulence and the angle of the vanes, and is on the scale of 104 Pa. The maximum pressure is applied to the vanes in the 65° geometry.

7. The results of the present study can have important applications in the design and construction of nuclear fuel assemblies and their grid spacers.